

奇异谱分析在 GPS 站坐标监测序列分析中的应用

王解先^{1,2}, 连丽珍^{1,3}, 沈云中^{1,2,3}

(1. 同济大学 测绘与地理信息学院, 上海 200092; 2. 同济大学 现代工程测量国家测绘地理信息局重点实验室, 上海 200092; 3. 同济大学 空间信息科学及可持续发展应用中心, 上海 200092)

摘要: 利用 SSA(奇异谱分析)对测站坐标时间序列进行数据处理,包括数据补缺、趋势项和周期项的识别和提取。奇异谱分析是一种从时间序列的动力重构出发并与经验正交函数相联系的统计技术,可以较好地含噪声的有限尺度时间序列中提取趋势和周期等信息,目前已应用于多种时间序列的分析中。将奇异谱分析的优点应用到 GPS 时间序列分析中:利用奇异谱分析对中国地壳运动观测网络 GPS 数据服务提供的测站坐标(NEU)时间序列(以 BJFS(北京房山)站为例)进行补缺,各向插补的均方误差均为 mm 级;根据降噪重构序列提取坐标时间序列中的趋势成分(N 方向 $-11.688 \text{ mm} \cdot \text{年}^{-1}$, E 方向 $29.585 \text{ mm} \cdot \text{年}^{-1}$, U 方向 $2.557 \text{ mm} \cdot \text{年}^{-1}$)和周期成分(N, U 方向上存在年周期和半年周期, U 方向上还存在着 1.5 年和 0.25 年左右的周期, E 方向上只存在年周期);对完整序列进行重构降噪,即从原始序列中提取有用信息而丢弃一些干扰信息,起着平滑作用。试验结果表明, BJFS 站的各方向上均存在显著的变动周期和明显的趋势,也有较多的噪声信息。

关键词: 奇异谱分析; 坐标时间序列; 趋势周期; 降噪

中图分类号: P228.9

文献标志码: A

Application of Singular Spectral Analysis to GPS Station Coordinate Monitoring Series

WANG Jie-xian^{1,2}, LIAN Li-zhen^{1,3}, SHEN Yun-zhong^{1,2,3}

(1. College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Advanced Surveying Engineering of State Bureau of Surveying and Mapping, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Spatial Information Science and Sustainable Development Applications Center, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Singular spectrum analysis(SSA) was introduced to data processing of station coordinates, including treatment of missing values, identification and extraction of trends and cycles. Singular spectrum analysis, a statistical technique with reconstruction and empirical orthogonal function, could

effectively extract trends and cycles from the limited scale of the time series with noise. Hence, SSA was applied to various time series analysis such as the process of GPS time series. Coordinate time series from crustal movement observation network of China GPS data services were used by SSA for treatment of missing values, and the mean square errors (MSE) of the interpolation in every direction were at millimeter degree, reconstruction and extraction of trend (N : $-11.688 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$; E : $29.585 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$; U : $2.557 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$) and cycle components (N : $0.5\text{a}, 1\text{a}$; E : 1a ; U : $0.25\text{a}, 0.5\text{a}, 1\text{a}, 1.5\text{a}$). The results show that obvious trend, significant cycles and noise do exist in each direction of Beijing Fangshan Station (BJFS).

Key words: singular spectral analysis (SSA); coordinate series; trend cycle; noise reduction

奇异谱分析(singular spectrum analysis, SSA)^[1]是在 Karhunen-Loeve 分解理论的基础上发展起来的,最早应用于数字信号处理,其后被推广到海洋学、非线性动力学领域,近年来又开始应用于气候诊断和预测。它是一种广义功率谱分析,不受正弦波假定的约束,对信号的识别和描述采用时域性的频域特征分析方式,具有稳定识别和强化周期信号的功能。因此,SSA 可以从包含噪声的数据序列中尽可能多地提取可靠信息,把最可预报的分量聚集到若干个时间序列中,并提取具有显著振荡行为的信号分量,以此选择若干有意义的分量进行序列重建,降低噪声。

对于 GPS 站坐标监测序列分析,国内外已有不少相关研究,也取得较大进展。Nikolaïdis^[2]根据坐标序列表现出的年周期项和半年周期项特性,利用加权最小二乘求解站点运动的速度和周期项振幅,在没有地震发生时,采用线性趋势和年、半年周期函

数以及阶跃函数拟合坐标序列;有地震发生时,拟合模型中加上同震位移和指数衰减等.张鹏等^[3]对中国地壳运动观测网络(CMONOC)的 27 个基准站和未纳入 CMONOC 的 2 个跟踪站从 1999 年到 2004 年的 GPS 观测数据进行谱分析,发现高程方向表现明显年周期特性,有些站点水平方向也具有年周期特性,但不明显.黄立人等^[4]对中国地壳运动观测网络中 27 个 GPS 连续站坐标序列进行噪声分析,研究表明:大部分站可以用白噪声加闪烁噪声模型描述, N 方向分量的噪声最小, E 方向比 N 方向的噪声大, U 方向的噪声最大,而且观测噪声中有色噪声存在情况下,仅考虑白噪声估计站点速度是不准确的.利用 CMONOC 进行地震观测预报方面的研究主要有:江在森等^[5]利用 CMONOC 提供坐标序列研究昆仑山口西 8.1 级地震前坐标序列变化和区域构造变形,发现地震的发生与大区域的水平运动和变形有关,指出地震正好发生在与断裂走向一致的左旋剪切应变率量值最高速的区域和面膨胀应变的张性区.该研究为国内地震预测提供了重要的参考依据.因此分析研究基准站变化,高精度确定其变化趋势显得尤为重要.本文主要是将 SSA 方法应用到 BJFS 站坐标时间序列分析中,探讨 BJFS 站在东西、

南北方向上的位移以及高程方向上的变形.

1 SSA 数学模型原理

SSA^[6,8]的分析对象是经过中心化后的 1 维时间序列 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$,为了了解隐含的时间演变结构,将该序列在时间上滞后排列为

$$X = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_{i+1} & \dots & x_{N-M+1} \\ x_2 & x_3 & \dots & x_{i+2} & \dots & x_{N-M+2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ x_M & x_{M+1} & \dots & x_{i+M} & \dots & x_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{1,0} & X_{1,1} & \dots & X_{1,N-M} \\ X_{2,0} & X_{2,1} & \dots & X_{2,N-M} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ X_{M,0} & X_{M,1} & \dots & X_{M,N-M} \end{pmatrix} \quad (1)$$

把式(1)看作 M 个容量为 $N-M+1$ 的样本,则式(1)变量间的协方差是原序列 x_i 不同滞后长度的自协方差,进一步对其做主成分分析.分析步骤如下:

(1) 计算滞后自协方差矩阵 T_x 及其特征向量 E_k 和特征值 λ_k (由大至小排序)

$$T_x = \begin{pmatrix} C(0) & C(1) & C(2) & \dots & C(M-2) & C(M-1) \\ C(1) & C(0) & C(1) & \dots & C(M-3) & C(M-2) \\ C(2) & C(1) & C(0) & \dots & C(M-4) & C(M-3) \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ C(M-2) & C(M-3) & C(M-4) & \dots & C(0) & C(1) \\ C(M-1) & C(M-2) & C(M-3) & \dots & C(1) & C(0) \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中: T_x 是 Toeplitz 矩阵,为实对称矩阵.它的元素 $C(j)$ 用 x_1, x_2, \dots, x_N 序列估计,即

$$C(j) = \frac{1}{N-j} \sum_{i=1}^{N-j} x_i x_{i+j} \quad (3)$$

式中, $j=0, 1, 2, \dots, M-1$.

(2) 计算 X 的状态向量 X_i 在 E_k 上的投影

$$a_{i,k} = X_i \cdot E_k = \sum_{j=1}^M X_{ij} E_{j,k} = \sum_{j=1}^M x_{i+j} E_{j,k} \quad (4)$$

式中: $0 \leq i \leq N-M$. 特征向量 E_k 反映了 x 序列的时间演变型,称为时间 EOF (简称 T-EOF); $a_{i,k}$ 是 E_k 所反映的时间演变型在原序列的 $x_{i+1}, x_{i+2}, \dots, x_{i+M}$ 时段的权重,称为时间主成分(简称 T-PC).

(3) 重建成分 RC

由第 k 个 T-EOF 和 T-PC 重建 x_i 的成分 RC, 记为 $x_{i,k}$, 公式为

$$x_{i,k} = \begin{cases} \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M a_{i+j,k} E_{j,k}, & M \leq i \leq N-M+1 \\ \frac{1}{i} \sum_{j=1}^i a_{i-j,k} E_{j,k}, & 1 \leq i \leq M-1 \\ \frac{1}{N-i+1} \sum_{j=i-N+M}^M a_{i-j,k} E_{j,k}, & N-M+2 \leq i \leq N \end{cases} \quad (5)$$

(4) 趋势成分提取和周期成分分析

SSA 识别某个 RC 是否属于趋势成分采用 Kendall 非参数检验.考察第 k 个 RC 时,计算满足

$x_{i,k} < x_{j,k}$ 的指标数 K_r , 构造统计量 $\tau = \frac{4K_r}{N(N-1)}$

1. 当 x_k 不是趋势成分的原假设成立时, τ 服从均值为 0 且均方差为 $S = \sqrt{\frac{2(2N+5)}{9N(N-1)}}$ 的正态分布.因此,若取信度 $\alpha=0.05$, 当样本 τ 值落在 $-1.96S$ 和 $1.96S$ 以外时,拒绝原假设,认为第 k 个 RC 是趋势

成分. $\tau > 1.96S$ 和 $\tau < -1.96S$ 分别对应上升和下降趋势. 根据 SSA 原理, 当原序列中存在一个周期成分时, SSA 将得到一对 RC, 它们的特征值接近相等, 对应的一对 T-EOF 和 T-PC 分别正交. 原序列中的一个周期成分是满足这些条件的一对 RC 之和. Vautard 和 Ghil 对此提出了补充和修正的判据, 本文在此不再赘述.

(5) 重构时间序列

截取前 K 个贡献大的成分近似表示原序列 \hat{x}_i

$$= \sum_{k=1}^K x_{i,k}, i = 1, 2, \dots, N.$$

2 算例分析

本文对中国地壳运动观测网络 GPS 数据服务提供的基准站坐标序列进行相应的分析. 分析主要包括: ① 对各测站数据缺失情况进行了统计分析; ② 将数据分为训练数据、交叉验证数据和缺失数据, 采用奇异谱迭代插补方法, 选择交叉验证数据处的实际值与插补值的均方根误差最小来确定窗口和主成分个数, 再进行补缺^[9]; ③ 选定合适的窗口长度, 对补缺后的数据进行奇异谱分析, 提取趋势成分和周期成分, 并采用贡献率确定主成分个数, 进而重构观测序列, 降低噪声^[10].

2.1 数据来源与测站分布

本文数据来自中国地壳运动观测网络, 该网络共有三级网: 基准网、基本网和区域网. 基准网是基本框架, 由 27 个 GPS 连续观测站构成, 主要功能是监测中国大陆一级块体的构造运动. 基本网由 55 个定期复测的 GPS 站组成, 主要用于一级块体本身及块体间的地壳变动的监测. 区域网由 1 000 个不定期复测的 GPS 站组成, 分 10 个监测区布设. 具体分布情况见图 1.

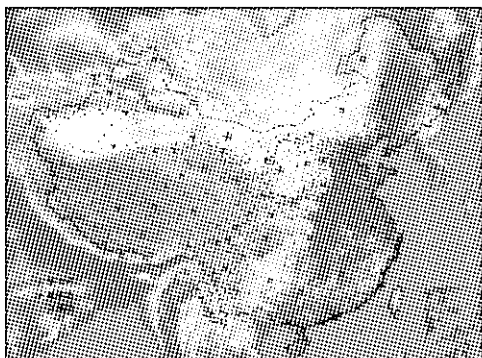


图 1 各级网测站分布情况

Fig.1 The distribution of stations

由于文章篇幅有限, 本文以基准网中的 BJFS 站点坐标序列为例利用 SSA 进行分析, 主要包括补缺、趋势周期提取和重构降噪^[11-15].

2.2 缺失数据统计及 SSA 迭代插补

由于客观原因, 各个站点的观测序列都具有一定程度的不连续性. 对于 BJFS 站序列而言, 实际数据的缺失率为 2.76%, 缺失数据分布如图 2 所示. 图中, 点值为 1 之处即缺失位置, 由图可以看出该站点数据缺失情况较不连续, 分布也较不均匀.

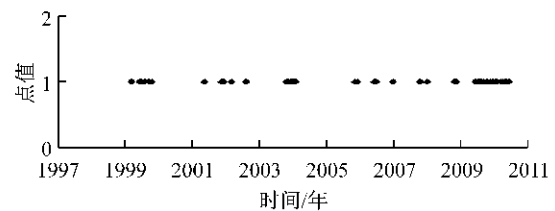


图 2 BJFS 缺失数据分布情况

Fig.2 The distribution of missing data at BJFS

为了验证 SSA 迭代插补的效果, 选取该站点 2000 年全年完整数据(设序列长度为 N)进行试算. 具体过程如下:

(1) 分别以缺失率 10% 和 20% 随机抽取部分数据作为缺失数据, 并在剩下的 90% 和 80% 的数据中随机抽取 10% 的数据作为交叉验证数据, 其余全部作为训练数据.

(2) 将交叉验证数据和缺失数据置为 0, 取窗口长度 $M(5, N/3)$ 、重构成分个数 $(1, M-1)$, 并以交叉验证数据和缺失数据前后两次重构值之差小于指定限差(如本文中各方向统一取为 0.001 mm)作为退出内循环的条件.

(3) 退出内循环之后, 便可得到一对 (M, K) 对应的交叉验证数据的重构值与实际观测值的均方误差, 迭代计算所有 (M, K) 对应的交叉验证数据的均方误差序列. 不同窗口长度下的最小误差序列见图 3 至图 5(以缺失率 20% 为例). 从图 3、图 4 和图 5 可以看出, N, E, U 方向上交叉验证数据的均方误差随窗口长度 M 的变化情况不同.

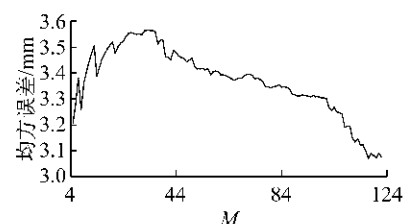


图 3 N 方向交叉验证数据均方误差随窗口的变化

Fig.3 MSE of cross-validation data (N) with window

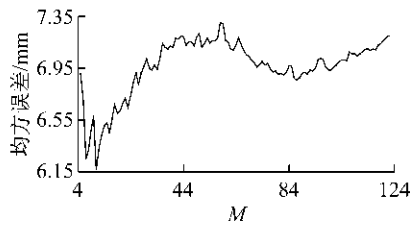


图 4 E 方向交叉验证数据均方误差随窗口的变化

Fig.4 MSE of cross-validation data (E) with window

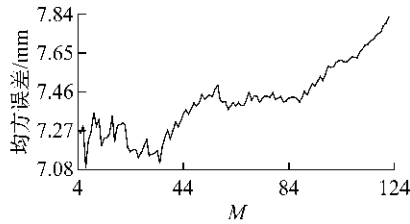


图 5 U 方向交叉验证数据均方误差随窗口的变化

Fig.5 MSE of cross-validation data (U) with window

(4) 以交叉验证数据的均方误差最小对应的 (M, K) 作为补缺时最优补缺窗口和重构成分个数, 结果见表 1.

表 1 最优窗口长度和重构成分个数(缺失率 20%)

Tab.1 Optimal window length and the number of reconstruction composition(missing rate 20%)

方向	窗口长度 M	重构成分个数 K
N	117	89
E	11	8
U	7	5

(5) 确定了窗口长度和重构成分个数(即表 1 中的 M 和 K)后即可进行补缺, 此时仅令缺失数据为 0, 其余均为观测值.

(6) 以缺失位置的重构值与其实际观测值的均方误差作为插补效果的一个检验指标, 结果(表 2)显示: N 方向插补效果最好, E 方向次之, U 方向则存在较大误差.

表 2 插补的均方误差

Tab.2 MSE of the interpolation

缺失率/%	均方误差/mm		
	N 方向	E 方向	U 方向
10	2.711	3.683	9.839
20	4.659	5.318	9.627

此外, 本文还给出了缺失率为 10% 和 20% 下的随机缺失插补结果, 见图 6 至图 11. 由图可以看出, 插补前后整体上还是比较吻合的, 采用 SSA 迭代插补是可行的, 这是一种有别于通常采用的多项式拟合插补的方法.

2.3 基于 SSA 的趋势和周期分析及重构

利用上述步骤对 BJFS 站全部数据的缺失部分

进行数据补缺, 接下去通过 SSA 便可提取 BJFS 站 (N, E, U 方向) 的趋势和周期成分, 具体数据结果

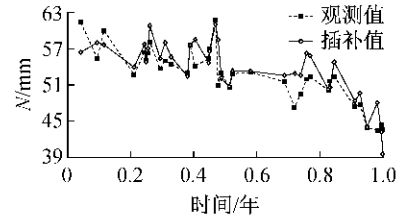


图 6 缺失率为 10% 时 N 方向插补情况(2000 年)

Fig.6 Fitting and real value of N with the missing rate of 10% (the year of 2000)

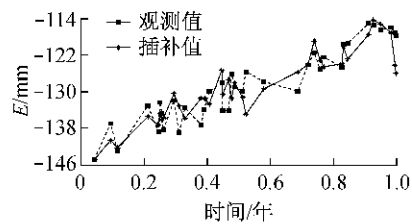


图 7 缺失率为 10% 时 E 方向插补情况(2000 年)

Fig.7 Fitting and real value of E (missing rate: 10%)

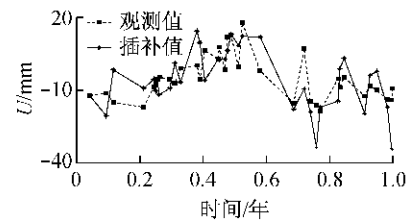


图 8 缺失率为 10% 时 U 方向插补情况(2000 年)

Fig.8 Fitting and real value of U with the missing rate of 10% (the year of 2000)

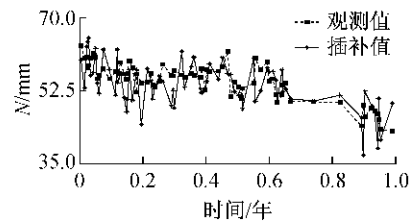


图 9 缺失率为 20% 时 N 方向插补情况(2000 年)

Fig.9 Fitting and real value of N with the missing rate of 20% (the year of 2000)

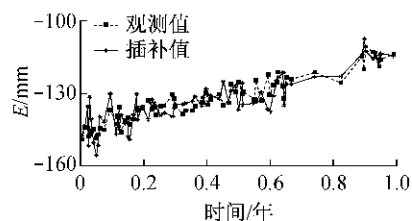


图 10 缺失率为 20% 时 E 方向插补情况(2000 年)

Fig.10 Fitting and real value of E with the missing rate of 10% (the year of 2000)

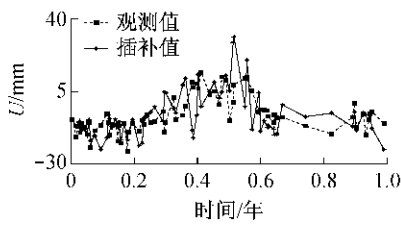


图 11 缺失率为 20% 时 U 方向插补情况(2000 年)

Fig. 11 Fitting and real value of U with the missing rate of 10% (the year of 2000)

见表 3. 此外,趋势周期拟合和重构情况见图 12 至图 20.

表 3 BJFS 站的趋势和周期

Tab.3 Trend and cycle of BJFS

方向	趋势/(mm · d ⁻¹)	周期/d
N	-0.032	396,100
E	0.081	356
U	0.007	624,356,188,96

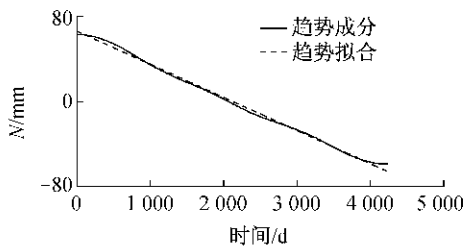


图 12 N 方向趋势成分和趋势拟合结果

Fig. 12 Trend component and trend fitting result of N

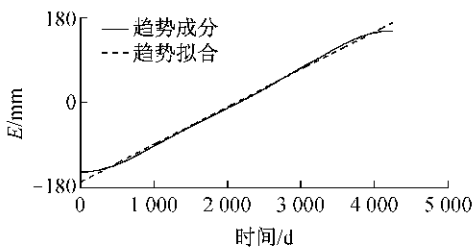


图 13 E 方向趋势成分和趋势拟合结果

Fig. 13 Trend component and trend fitting result of E

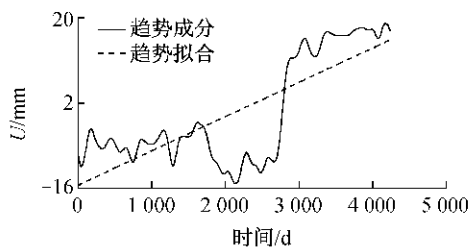


图 14 U 方向趋势成分和趋势拟合结果

Fig. 14 Trend component and trend fitting result of U

由图 12 至图 14 可以看出, BJFS 站 U 方向存在明显的上升趋势, E 方向存在明显的正向平移(即朝

北方向移动)趋势, 而 N 方向则是存在明显的负向偏移(即朝西方向移动)趋势.

由图 15 至图 17 中明显可以看出, BJFS 站点的 U 方向存在显著的周期项, 而 N 和 E 方向相对周期性较弱, 但是整体的趋势周期拟合效果较好, 拟合值比较贴近观测值, 模型的拟合优度^[16-19]达到 98.3%. 试验表明, 采用奇异谱分析提取趋势和周期信息方面是有效可行的: 3 个方向变化速率并不相同, E, N 方向远远强于 U 方向; 而 U 方向比 N, E 方向具有更强的周期性.

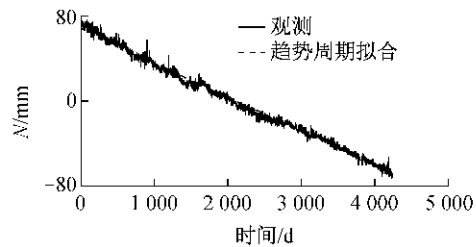


图 15 N 方向观测和趋势周期拟合结果

Fig. 15 Observation and trend-cycle fitting of N

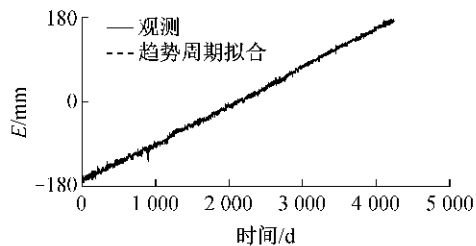


图 16 E 方向趋势成分和趋势周期拟合结果

Fig. 16 Observation and trend-cycle fitting of E

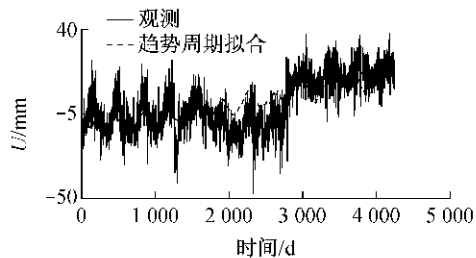


图 17 U 方向趋势成分和趋势周期拟合结果

Fig. 17 Observation and trend-cycle fitting of U

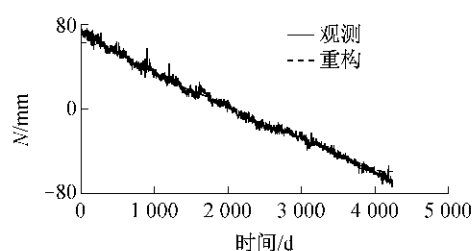


图 18 N 方向观测序列和重构结果

Fig. 18 Observation and reconstruction result of N

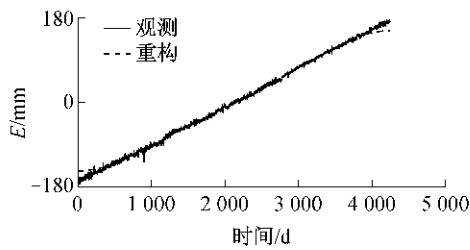


图19 E方向观测序列和重构结果

Fig.19 Observation and reconstruction result of E

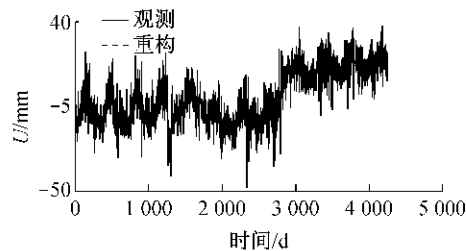


图20 U方向观测序列和重构结果

Fig.20 Observation and reconstruction result of U

同时,SSA过程中选取贡献率85%确定的成分个数进行重构,由图18至图20可以看出SSA重构后的序列比原始观测序列更为光滑,有明显的降噪效果。

3 结论

(1) 通过SSA迭代插补,可以较好地对接坐标序列进行补缺,各向插补的均方误差均为mm级,整体上可以满足精度要求。

(2) SSA可以有效分离并提取出序列中的趋势成分,进而得到较纯粹的趋势结果,减少了周期对趋势的影响。结果表明:BJFS站U向存在着 $2.557 \text{ mm} \cdot \text{年}^{-1}$ 的上升趋势,N向上有 $-11.688 \text{ mm} \cdot \text{年}^{-1}$ 的负向移动趋势,而E向上则有 $29.585 \text{ mm} \cdot \text{年}^{-1}$ 的正向移动趋势。

(3) SSA可以较好地识别和提取序列中的周期成分,BJFS站在N,U方向上存在年周期和半年周期,U方向上还存在着1.5年和0.25年左右的周期(即U方向周期性最强),而在E方向上只存在年周期。试验结果表明,SSA在周期选取方面具有较高的应用价值。

(4) SSA重构降噪可以从原始序列中提取有用信息而丢弃一些干扰信息,起着平滑作用。与移动平均等方法相比,这是另一种较好的尝试。

但是SSA的趋势识别和周期提取是建立在完整序列的基础之上的,而实际上各个观测站都存在

一定程度的数据缺失,因而在利用SSA对站点坐标(N,E,U)序列分析之前需要进行插补。虽然目前用SSA迭代插补(重构降噪原理)具有较好的效果,但插补的数据处理时间较长,有关计算效率方面仍有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] Vautard Robert, Pascal Yiu Michael Ghil. Singular-spectrum analysis: a toolkit for short, noisy chaotic signals[J]. Physical D: Nonlinear Phenomena, 1992, 58:95.
- [2] Nikolaidis, Rosanne. Observation of geodetic and seismic deformation with the Global Positioning System [D]. San Diego: University California, 2002
- [3] 张鹏,蒋志浩,秘金钟,等.我国GPS跟踪站数据处理与时间序列特征分析[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2007,32(3): 251.
ZHANG Peng, JIANG Zhihao, MI Jinzhong, et al. Data processing and time series analysis for GPS fiducial stations in China [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2007, 32(3): 251.
- [4] 黄立人. GPS基准站坐标分量时间序列的噪声特性分析[J]. 大地测量与地球动力学,2006,26(2):31.
HUANG Liren. Noise properties in time series of coordinate component at GPS fiducial stations[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2006, 26(2): 31.
- [5] 江在森,张希,祝意青. 昆仑山口西Ms8.1级地震前区域构造变形背景[J]. 中国科学,2003,33(Supplement 1):163.
JIANG Zaisen, ZHANG Xi, ZHU Yiqing. Regional tectonic background before the Ms 8.1 earthquake in the west of Kunlun Mountain's Gate [J]. Science in China, Series D, 2003, 33(Supplement 1):163.
- [6] Vautard R, Ghil M. Singular spectrum analysis in nonlinear dynamics, with applications to paleoclimatic time series[J]. Physical D: Nonlinear Phenomena, 1989, 35(3):395.
- [7] 吴洪宝. 奇异谱分析——最大熵预报方法[J]. 甘肃气象, 2000,18(1):229.
WU Hongbao. Singular spectral analysis—maximum entropy forecast method [J]. Gansu Meteorology, 2000,18(1):229.
- [8] 徐克红,程鹏飞,文汉江. 太阳黑子数时间序列的奇异谱分析和小波分析[J]. 测绘科学,2007,32(6):35.
XU Kehong, CHENG Pengfei, WEN Hanjiang. Singular spectrum analysis and wavelet analysis on time series of Sunspot[J]. Science of Surveying and Mapping, 2007,32(6):35.
- [9] 王辉赞,张初,刘巍,等. 奇异谱迭代插补的改进算法及其在缺损数据恢复中的应用[J]. 应用数学和力学,2008,29(10): 1227.
WANG Huizan, ZHANG Ren, LIU Wei, et al. Improved interpolation method based on singular spectrum analysis iteration and its application to missing data recovery [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2008, 29(10): 1227.
- [10] 刘元峰,赵玫. 基于奇异谱分析的混沌序列降噪[J]. 上海交通大学学报,2003,37(5):778.
LIU Yuanfeng, ZHAO Mei. Denoising of chaotic time series

- based on singular spectrum analysis[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2003, 37(5):778.
- [11] SHEN Yunzhong, LI Weiwei. Spatiotemporal related signal and noise analysis of GPS monitoring series of the base stations in China [C]//International Union of Geodesy and Geophysics Conference, Melbourne; Joint Australia and New Zealand Organising Committee, 2012; 1-10.
- [12] Mao A, Harrison C GA, Dixon T H. Noise in GPS coordinate time series. [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104 (B2): 2797.
- [13] 黄声享,刘经南. GPS 变形监测系统中消除噪声的一种有效方法[J]. *测绘学报*, 2002, 31(2):104.
HUANG Shengxiang, LIU Jingnan. A novel method for reducing noises in GPS deformation monitoring system [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2002, 31(2):104.
- [14] 黄立人,符养. GPS 连续观测站的噪声分析[J]. *地震学报*, 2007, 29(2):197.
HUANG Liren, FU Yang. Analysis on the noises from continuously monitoring GPS sites [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2007, 29(2): 197.
- [15] TIAN Yunfeng, SHEN Zhengkang, LI Peng. Analysis on correlated noise in continuous GPS observation [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2011, 32(6):696.
- [16] Williams S D P, Bock Y, Fang P, et al. Error analysis of continuous GPS position time series [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109(B03412):19.
- [17] YANG Linguo, DING Xiaoli, CHEN Wu, et al. Characteristics of daily position time series from the Hong Kong GPS fiducial network [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51(5): 1372.
- [18] Amiri-Simrooei. Least-squares variance component estimation, theory and GPS applications [D]. Delft: Delft University of Technology, 2007.
- [19] Langbein J, Johnson H. Correlated errors in geodetic time series: implications for time-dependent deformation [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(B1): 591.

~~~~~

(上接第 252 页)

- [6] WANG Zhiwei, WU Zhichao, MAI Suihai, et al. Research and application of membrane bioreactor in China: progress and prospect [J]. *Separation and Purification Technology*, 2008, 62 (2):249.
- [7] Yang Wenbo, Cicek Nazim, John Ilg. State-of-the-art of membrane bioreactors: worldwide research and commercial applications in North America [J]. *Journal of Membrane Science*, 2006, 270(1):201.
- [8] ZHENG Xiang, ZHOU Yufen, CHEN Shaohua, et al. Survey of MBR market: trends and perspectives in China [J]. *Desalination*, 2010, 250(2):609.
- [9] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.  
State Environmental Protection Administration of People's Republic China. *Water and wastewater monitoring methods [M]*. 4th ed. Beijing: Chinese Environmental Science Publishing House, 2002.
- [10] 郑林静. 半集中式处理系统灰水处理模块技术经济分析 [D]. 上海: 同济大学环境科学与工程学院, 2007.  
ZHENG Linjing. Technological and economic analysis on grey water treatment of semi-centralized supply and treatment systems [D]. Shanghai: College of Environmental Science and Engineering of Tongji University, 2007.
- [11] Friedler E, Galil N I. On-site greywater reuse in multi-storey buildings. sustainable solution for water saving [C/CD] // Efficient 2003, 2nd International Conference on Efficient Use and Management of Urban Water Supply, Tenerife; IWA, AWWA and ARAS, 2003.
- [12] 傅国伟. 给排水系统优化导论 [J]. *中国给水排水*, 1987, 4: 45.  
FU Guowei. The introduction of the water supply and drainage system optimization [J]. *China Water & Wastewater*, 1987, 4: 45.
- [13] 阮久丽, 于凤, 陈洪斌, 等. 生活污水分类收集处理的探讨 [J]. *中国给水排水*, 2010, 26(8):25.  
RUAN Jiuli, YU Feng, CHEN Hongbin, et al. Discussion on categorized collection and quality-based treatment of domestic sewage [J]. *China Water & Wastewater*, 2010, 26(8):25.
- [14] 李红瑛. A/O-MBR 处理低浓度生活污水试验研究 [D]. 南京: 河海大学市政工程学院, 2007.  
LI Hongying. Research on low concentration sewage treatment by A/O-MBR technology [D]. Nanjing: College of Environmental and Engineering of Hohai University, 2007.
- [15] 曹斌, 黄震, 北中敦, 等. A2-O 膜生物反应器强化生物脱氮除磷中试研究 [J]. *中国给水排水*, 2007, 23(3):22.  
Cao Bin, Huang Xia, Atsushi Kitanaka, et al. Pilot test on enhanced biological nitrogen and phosphorus removal by using A<sub>2</sub>/O-MBR [J]. *China Water & Wastewater*, 2007, 23(3):22.
- [16] Saravanan VS, Mollinga P Peter, Bogardi J Janos. Global change, wastewater and health in fast growing economies [J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2011, 3:461.
- [17] 杨川, 王晓羽, 王丹, 等. 再生水紫外-氯组合消毒与单一氯消毒比较分析 [J]. *供水技术*, 2011, 5(1):19.  
YANG Chuan, WANG Xiaoyu, WANG Dan, et al. Comparative analysis of reclaimed water disinfection by UV-chlorine combination and single chlorine process [J]. *Water Technology*, 2011, 5(1):19.
- [18] 张永吉, 刘文君. 紫外线对自来水中微生物的灭活作用 [J]. *中国给水排水*, 2005, 21(9):2.  
ZHANG Yongji, LIU Wenjun. Inactivation of microbe in drinking water using ultraviolet irradiation [J]. *China Water & Wastewater*, 2005, 21(9):2.
- [19] 王俊娇. 紫外消毒技术在再生水中的研究 [D]. 北京: 北京工业大学建筑工程学院, 2006.  
WANG Junjiao. Study on ultraviolet disinfection technology used in reclaimed water [D]. Beijing: College of Architecture and Civil Engineering of Beijing University of Technology, 2006.